

ГИПЕРНОВЫЕ И ГАММА-ВСПЛЕСКИ

К. А. ПОСТНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

GAMMA-RAY BURSTS AND HYPERNOVAE

K. A. POSTNOV

The recent multiwavelength observations of cosmic gamma-ray bursts and their afterglows point to a possible association of gamma-ray bursts with extremely energetic peculiar supernova explosions of rare type Ibc. Is this association firmly established and can we be completely sure that gamma-ray bursts originate during the core collapse of massive stars?

Новейшие данные многоволновых наблюдений космических гамма-всплесков и их послесвечений (ореолов) указывают на возможную связь гамма-всплесков и необычайно энергичных, редко встречающихся сверхновых типа Ibc (гиперновые). Так ли надежно установлена эта ассоциация и можно ли с полной уверенностью связывать происхождение гамма-всплесков с коллапсом ядер массивных звезд?

journal.issep.rssi.ru

КАК РАЗЛИЧИТЬ ОДНОГО ИЗ МИЛЛИОНА

В астрофизических исследованиях последних лет известно не так уж много явлений, природа которых вызывает споры ученых на протяжении нескольких десятилетий. Космические гамма-всплески принадлежат к их числу. Открытые в конце 1960-х годов как мощные короткие всплески жесткого рентгеновского излучения, спорадически возникающие в разных местах небесной сферы, эти явления представляли собой полную загадку вплоть до конца 1990-х годов [1–3]. Основная причина почти тридцатилетней загадки крылась в крайне большой неопределенности области регистрации гамма-фотонов (так называемый бокс ошибок) — в лучшем случае около одного квадратного градуса на небесной сфере. Чтобы оценить, много это или мало, напомним, что площадь всей небесной сферы 4π стерadians, то есть чуть больше 40 000 квадратных градусов. С учетом известного факта, что во Вселенной насчитывается порядка 10^{11} галактик, в одноградусную область локализации типичного гамма-всплеска на небесной сфере попадает около миллиона только внегалактических астрономических объектов. Мы умышленно упомянули только далекие галактики, так как статистические подсчеты источников гамма-всплесков (даже с плохой локализацией), проведенные по однородной выборке по данным космической гамма-обсерватории им. А.Х. Комптона (CGRO), недвусмысленно указывали на космологическую природу гамма-всплесков. (Речь идет о так называемом тесте $\log N - \log S$, то есть зависимости числа источников от принимаемого потока излучения. В евклидовом пространстве с однородным распределением источников $N(>S) \sim S^{-3/2}$. В области слабых потоков гамма-всплески значительно отклоняются от этой зависимости. Именно это ожидается от источников на космологических расстояниях из-за более сильной, чем $\frac{1}{r^2}$, зависимости изменения

потока излучения с расстоянием от далекого источника в расширяющейся Вселенной.) Поэтому на первый план в исследованиях гамма-всплесков в 1990-е годы

ставилась задача их отождествления с известными астрономическими объектами.

В отличие от обычного света гамма-фотоны с энергией ~ 100 кэВ очень трудно сфокусировать, поэтому до сих пор не создано гамма-телескопа, фокусирующего гамма-лучи. Вместо этого в современных гамма-обсерваториях (пример — международная космическая гамма-обсерватория “Интеграл”, выведенная на высокоапогейную орбиту российским носителем “Протон” 17 октября 2002 г.) используется так называемый метод кодированной апертуры. Перед набором полупроводниковых кристаллических детекторов гамма-квантов (обычно используют кристаллы CsI или сверхчистый германий) устанавливают маску, состоящую из специальным образом упорядоченного набора непрозрачных для гамма-лучей элементов (обычно из вольфрама). Каждый космический источник, попадающий в поле зрения такого телескопа (обычно несколько градусов), создает свою «тень» маски на элементах детектора. Существует определенная математическая процедура раскодирования полученного изображения. В результате удается построить карту неба в гамма-диапазоне с угловым разрешением в несколько угловых минут. Таким образом строятся карты неба в жестком рентгеновском диапазоне телескопом IBIS обсерватории “Интеграл”.

Локализация гамма-всплесков может также осуществляться с использованием метода триангуляции от нескольких (не менее трех) космических аппаратов. Идея состоит в использовании измерения задержки прихода волнового фронта от всплеска на различные космические аппараты. Чем дальше находятся аппараты друг от друга, тем точнее область локализации. По относительной задержке времени прихода сигнала, связанной с конечной скоростью распространения света, каждые два аппарата позволяют определить на небесной сфере кольцо вокруг оси, соединяющей аппараты, откуда приходит сигнал. Значит, для определения местоположения источника нужны как минимум три аппарата. В настоящее время наилучшая локализация осуществляется с привлечением данных гамма-детекторов, установленных на удаленных от Земли аппаратах “Улисс” и “Марс—Одиссей”.

АСТРОНОМЫ БЕРУТ СЛЕД

Как часто бывает в науке, настоящий прорыв в изучении гамма-всплесков произошел, когда их отождествили с источниками в другом диапазоне электромагнитного спектра. Это произошло в 1997 г., когда с помощью итало-голландского специализированного спутника “Беппо-Сакс” удалось быстро (через несколько часов после гамма-всплеска 28 февраля 1997 г.) навести бортовой рентгеновский телескоп с широким полем зрения на грубо известную область гамма-всплеска, опре-

деленную бортовым гамма-монитором. Рентгеновский телескоп обнаружил в этой области новый переменный источник. Положение рентгеновского источника на небе определяется с лучшей точностью в несколько угловых минут (а современным космическим рентгеновским телескопом “Чандра” — в несколько угловых секунд!), что позволяет подключить к поискам нового объекта всю мощь наземных и космических оптических и радиотелескопов. Так и случилось: внутри бокса ошибок нового рентгеновского источника (такие источники принято называть транзиентными) крупные оптические телескопы обнаружили новый источник, поток от которого уменьшался со временем [2, 4].

Как правило, сразу же или по мере ослабления оптического транзиента на месте гамма-всплеска видна слабая галактика, которую называют родительской галактикой гамма-всплеска. Иногда в спектре самого оптического транзиента видны спектральные линии поглощения или излучения, которые позволяют определить красное смещение (вернее, дают его нижний предел) и тем самым оценить расстояние до него. Часто красное смещение определяется только по предполагаемой родительской галактике всплеска. Как бы то ни было, представляется надежно установленным фактом [5], что гамма-всплески происходят в далеких галактиках с красным смещением от $z > 0,1$. Таким образом, характерное расстояние d до них порядка гигапарсека (напомним, что 1 парсек $\approx 3 \cdot 10^{18}$ см) и более.

Регистрируемая детекторами на Земле энергия за время гамма-всплеска (от долей секунды до нескольких сот секунд) составляет $S \sim 10^{-4} - 10^{-7}$ эрг/см², откуда находим, что в гамма-всплесках выделяется колоссальная электромагнитная энергия $\Delta E \approx 4\pi d^2 S \sim 10^{50} - 10^{53}$ эрг! Такая энергия вырабатывается десятками звезд типа Солнца за все время их существования (около 10 млрд лет) и сопоставима с энергией массы покоя Солнца ($\sim 2 \cdot 10^{54}$ эрг). Максимальная светимость мощного гамма-всплеска бывает сопоставимой с мгновенной электромагнитной светимостью всех звезд видимой Вселенной $\sim 10^{54}$ эрг/с [4]. Совершенно ясно, что в явлении гамма-всплесков мы сталкиваемся с величайшей из известных космических катастроф, и возникает вопрос о причинах и механизмах выделения такой большой энергии за короткое время гамма-всплеска.

КОГДА СЛЕДСТВИЕ ПОНЯТНЕЕ ПРИЧИНЫ

Как это ни парадоксально, в настоящее время астрофизики гораздо лучше понимают не сам гамма-всплеск, а его послесвечение в более мягких диапазонах спектра (рентгеновском, оптическом, радио). Существование таких послесвечений (или подбирая вместо примитивной кальки русскоязычный синоним английскому термину afterglow — ореолов) было предсказано за

несколько лет до их открытия в работах сэра Мартина Риса (M.J. Rees) из Института астрономии Кембриджского университета и видного американского астрофизика Питера Месароша (P. Meszaros) из Пенсильванского университета в Филадельфии. Дело в том, что еще в середине 1970-х годов, вскоре после первой публикации о космических гамма-всплесках в 1973 г., стало ясно, что, если эти явления происходят в далеких галактиках, возникает противоречие между огромной выделяемой энергией и наблюдаемыми свойствами гамма-всплесков – их тонкой временной структурой (наблюдаемое минимальное время физической переменности принимаемого потока $\delta t \approx 1-10$ мс) и нетепловым характером спектра.

Суть этого противоречия, которое называют проблемой компактности, состоит в том, что, с одной стороны, физическая переменность по принципу причинности свидетельствует о минимальном размере излучающей области $\delta R \leq c\delta t \approx 3 \cdot 10^7$ см (здесь $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света). С другой стороны, в столь малом объеме плотность энергии излучения при энерговыделении в $\sim 10^{51}$ эрг так высока, что фотоны интенсивно взаимодействуют друг с другом, порождая электрон-позитронные пары, и в результате формируется оптически толстый огненный шар. Эта ситуация напоминает раннюю Вселенную, в которой излучение находилось в термодинамическом равновесии с веществом. По мере расширения и остывания такой шар станет прозрачным для выхода фотонов, но при этом, как известно, будет наблюдаться чисто тепловой (планковский) спектр (в современной Вселенной это реликтовое излучение).

Проблему компактности удастся изящно решить, допустив ультррелятивистское расширение такого огненного шара. Ключевой момент здесь состоит в том, что при ультррелятивистских движениях с большим лоренц-фактором $\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \gg 1$ размер причинно-связанной области должен записываться как $\delta R \approx \approx 2\Gamma^2 c\delta t$, что сильно увеличивает допустимый объем. Кроме того, лоренц-фактор войдет в выражение для излучаемого потока энергии. Расчет показывает, что для решения проблемы компактности необходимый лоренц-фактор $\Gamma \geq 100-300$. Это рекордное значение для скорости движения вещества, известное в астрофизике (например, в самых быстрых струйных выбросах – джетах от ядер активных галактик и квазаров наблюдаемое значение $\Gamma \sim 10$). Здесь заметим, что для того, чтобы вещество могло двигаться с такими высокими скоростями (скорость света с точностью до пятого (!) знака после запятой) при характерной энергии 10^{51} эрг, полная масса барионов (протонов и нейтронов) в нем не

может превышать $\sim 10^{-5} M_{\odot}$, порядка массы Земли. Это так называемая проблема барионного загрязнения огненного шара [4].

Как впервые отметили Рис и Месарош в 1992 г., если такое ультррелятивистское движение вещества порождается гипотетической “центральной машиной”, в реальных астрофизических условиях (межзвездная или межгалактическая среда) могут возникать релятивистские ударные волны. За фронтом образовавшейся ударной волны заметная доля кинетической энергии движения барионов огненного шара может расходоваться на ускорение частиц подобно тому, как это происходит в обычных ударных волнах, наблюдаемых от оболочек сверхновых звезд в межзвездной среде. Незбежное присутствие магнитных полей в межзвездной плазме приведет к эффективному высвечиванию кинетической энергии ускоренных электронов синхротронным излучением и при обратном комптоновском рассеянии мягких фотонов на релятивистских частицах. Именно так, по мнению авторов этой гипотезы, могут образовываться как сами гамма-всплески, так и их более мягкие ореолы.

Если происхождение гамма-излучения в такой модели до сих пор подвергается сомнению, то рентгеновское и оптическое излучение после гамма-всплеска иногда достаточно удовлетворительно объясняется распространением релятивистской ударной волны в окружающей гамма-всплеск межзвездной среде. Важно отметить, что, как и в классической задаче о сильном взрыве в среде (решение Седова–фон Неймана–Теллера), в случае ультррелятивистских ударных волн существует автомодельное решение, в котором эволюция физических параметров ударной волны описывается степенным от времени законом. Оно было получено Роджером Блэндфордом и Кристофером Мак-Ки в 1975 г. Но именно степенные законы спадания потоков от времени и наблюдаются (в первом приближении) в большинстве рентгеновских и оптических ореолов гамма-всплесков.

ДЖЕТЫ И УНИВЕРСАЛЬНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Еще до открытия ореолов гамма-всплесков спутником “Беппо-Сакс” американские астрофизики Богдан Пачиньский и Джеймс Роуд теоретически рассмотрели ситуацию, когда энерговыделение в гамма-всплеске происходит не сферически-симметрично, а в узком конусе с углом θ_j . Ясно, что в таком случае энергетика гамма-всплеска уменьшится на фактор (в случае малых θ_j) $\approx \theta_j^2/2$. Это существенно, так как уже при углах в несколько градусов требование к энерговыделению снижается на два-три порядка величины. Конечно,

во столько же раз возрастет частота встречаемости гамма-всплесков в год в расчете, скажем, на единицу объема (см. ниже).

Если энерговыделение происходит в узком конусе (джете), на кривой блеска оптического ореола в некоторый момент времени возникнет особенность в виде смены “режимов” темпа спадания блеска. Действительно, пока скорость излучающей области за фронтом ударной волны достаточно велика, $\Gamma > 1/\theta_j$, из-за эффекта релятивистской абберации излучения (эффект прожектора – почти вся мощность излучения сосредоточена в узком конусе с углом $\approx 1/\Gamma$) наблюдатель не может отличить ситуацию от сферически-симметричной. Однако по мере торможения ударной волны в момент $\Gamma(t_j) \approx 1/\theta_j$ в область причинной связности попадают “стенки” джета и уменьшение потока при прочих равных условиях станет происходить быстрее, чем в сферически-симметричном случае, поскольку видимый размер излучающей области перестает расти по мере торможения. Но именно такие изломы и наблюдаются практически во всех известных оптических ореолах гамма-всплесков на временах от нескольких часов до нескольких суток после всплеска (см. рис. 2)! Это обстоятельство было использовано в 2001 г. американским радиоастрономом Дэйлом Фрэйлом с соавторами для оценки истинного, то есть исправленного за присутствие джета, энерговыделения гамма-всплесков с известными красными смещениями (на 2004 г. таких известно свыше 20). В результате оказалось, что видимый широкий (четыре-пять порядков величины) разброс энергий гамма-всплесков, оцененных в предположении о сферической симметрии, сужается до полутора порядков вблизи некоторого центрального значения $E_0 \approx 5 \cdot 10^{50}$ эрг!

Отметим, что автор (совместно с В.М. Липуновым и М.Е. Прохоровым) еще в 1999 г. высказал гипотезу об универсальном энерговыделении гамма-всплесков именно вблизи этого значения и показал, что существовавшая тогда статистика распределения наблюдаемых энергий и расстояний до гамма-всплесков (всего несколько событий на конец 1999 г.) не противоречила этой гипотезе. Более того, мы предложили модель «универсального джета» гамма-всплеска, по которой энерговыделение в джете происходит неравномерно в зависимости от угла до оси джета. Эту модель “переоткрыли” в 2002 г. аспирантка М. Риса Елена Росси с соавторами. Современный анализ временного поведения и спектров ореолов гамма-всплесков приводит к заключению о возможности построения феноменологической универсальной модели джета, хотя детальный расчет обратной задачи оказывается крайне сложным.

ВОЗВРАЩАЯСЬ К ИСТОКАМ

Резюмируя изложенное выше, можно сказать, что, несомненно, космические гамма-всплески представляют собой кратковременное мощное выделение электромагнитной энергии в межзвездной среде удаленных галактик. Что же является их причиной? Имеем ли мы дело с редким необычным проявлением хорошо известных космических объектов или это нечто совершенно новое в астрофизике? Сразу скажем, что окончательного ответа на этот вопрос до сих пор нет, поэтому выбор модели источников гамма-всплесков за дальнейшими наблюдениями. Широко распространенной (но до конца необщепринятой) моделью их происхождения является гипотеза коллапсара, которую часто также называют гипотезой гиперновой (рис. 1). (Термин «гиперновая» был введен американским астрофизиком Богданом Пачиньским в 1998 г. для обозначения необычно сильного взрыва сверхновой, в результате которого оставалась черная дыра и происходил гамма-всплеск.) Однако, прежде чем перейти к изложению этой гипотезы, рассмотрим еще несколько установленных наблюдательных фактов.

В кривых блеска уже первых отождествленных оптических ореолов гамма-всплесков на временах порядка нескольких недель была обнаружена особенность, которая не вписывалась в рамки простой синхротронной модели излучения релятивистской ударной волны. На этих временных шкалах скорость изменения блеска оптического ореола заметно уменьшалась, то есть наблюдалось нечто вроде плато или даже временного

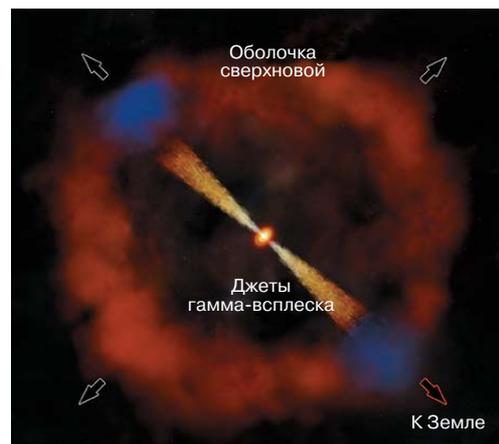


Рис. 1. Гамма-всплеск в модели коллапсирующего ядра массивной звезды. Наблюдатель “видит” гамма-всплеск, если в его луч зрения попадает один из джетов. Красным цветом показана оболочка сверхновой, с которой предположительно ассоциируется гамма-всплеск

увеличения блеска. Ореол в это время заметно “краснел”. При нетепловом синхротронном излучении релятивистских электронов “цвет” определяется только распределением частиц по энергиям, которое носит практически универсальный характер $\frac{dN}{dE} \sim E^{-2.2}$ и не зависит от скорости ударной волны, поэтому на фазе торможения ударной волны в межзвездной среде “цвет” излучения не должен меняться. Эта особенность указывает на появление тепловой компоненты излучения.

Примерно через год после открытия первого оптического ореола от гамма-всплеска 980425 (то есть 25 апреля 1998 г.) был зарегистрирован рентгеновский ореол, положение которого оказалось вблизи открытой в оптическом диапазоне сверхновой SN 1998bw в достаточно близкой галактике, находящейся на расстоянии порядка 400 мегапарсек (рис. 2). Удивительным также оказалось и то, что время вспышки этой сверхновой, экстраполированное от максимума ее блеска, совпадало со временем гамма-всплеска. Более того, эта сверхновая принадлежала к редкому классу сверхновых типа Ibc, которые, как полагают, являются результатом гравитационного коллапса ядер звезд типа Вольфа–Райе, которые находятся на поздних стадиях термоядерной эволюции и лишены водородной оболочки. Моделирование кривой блеска и спектров SN 1998bw привело к выводу о необычайно большой кинетической энергии оболочки сверхновой (по разным оценкам, $\sim 3 \cdot 10^{51} - 10^{52}$ эрг), на порядок больше обычных сверхновых. Максимум оптического блеска сверхновых приходится на времена несколько недель – месяц после взрыва и связан (в сверхновых I типа) с радиоактивным распа-

дом элементов группы железа (в первую очередь радиоактивного никеля), образовавшихся при коллапсе.

ДВЕ СТОРОНЫ ОДНОЙ МЕДАЛИ

Эти наблюдения послужили основанием для гипотезы об ассоциации гамма-всплесков с определенным типом сверхновых, а именно наиболее энергичных сверхновых типа Ibc (гиперновых). Таких гиперновых известно не много, частота встречаемости в расчете на галактику типа Млечного Пути составляет порядка одной в 1000 лет, в то время как частота коллапсирующих сверхновых по меньшей мере на порядок выше. Но даже из известных SN Ibc только несколько процентов имели энергию, сопоставимую с энергией SN 1998bw, поэтому хорошей оценкой темпа встречаемости энергичных SN Ibc является цифра один раз в 100 000 лет.

Что до гамма-всплесков, то их наблюдаемый темп регистрации составляет порядка 1 в день или в пересчете на среднюю галактику во Вселенной около 1 в 10^7 лет. Вспоминая о коррекции темпа встречаемости за фактор направленности $\frac{2}{\theta_j^2} \sim 50 - 500$, получаем для частоты

встречаемости гамма-всплесков в типичной галактике величину один раз в 10^5 лет в согласии с приведенной выше оценкой для гиперновых. Разумеется, это грубое совпадение еще ни о чем не говорит и нужны более весомые доказательства для ассоциации гамма-всплесков с коллапсом ядер массивных звезд.

Сначала сторонники гипотезы происхождения гамма-всплесков в результате коллапса ядер массивных звезд пытались с переменным успехом объяснить поярчения на поздних оптических кривых блеска ореолов гамма-всплесков, помещая “каноническую” сверхновую SN 1998bw на соответствующие расстояния. При этом часто время вспышки сверхновой приходилось несколько сдвигать относительно времени возникновения изучаемого всплеска. Но самым сильным аргументом в пользу ассоциации сверхновые – гамма-всплески послужили спектроскопические наблюдения ореола одного из ярчайших гамма-всплесков 29 марта 2003 г. Этот всплеск, произошедший на расстоянии порядка 800 мегапарсек, отличался особым разнообразием деталей на кривой блеска оптического ореола (рис. 3, 4). На фоне в среднем степенного спада блеска от времени наблюдались многократные поярчения начиная со времени в несколько дней после всплеска. Конечно, эти поярчения не могут объясняться никакими сверхновыми. Однако примерно через неделю в непрерывном спектре ореола стали проявляться широкие особенности, которые напоминали спектр SN 1998bw, а спадание блеска стало замедляться (рис. 5). Эти впечатляющие результаты у многих практически не оставили

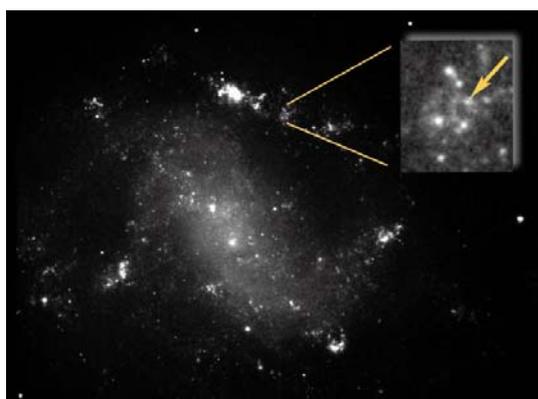


Рис. 2. Галактика ESO 184-g8, в которой произошел гамма-всплеск 980425. На врезке стрелкой показано положение сверхновой SN 1998bw, которая, как полагают, ассоциируется с этим гамма-всплеском

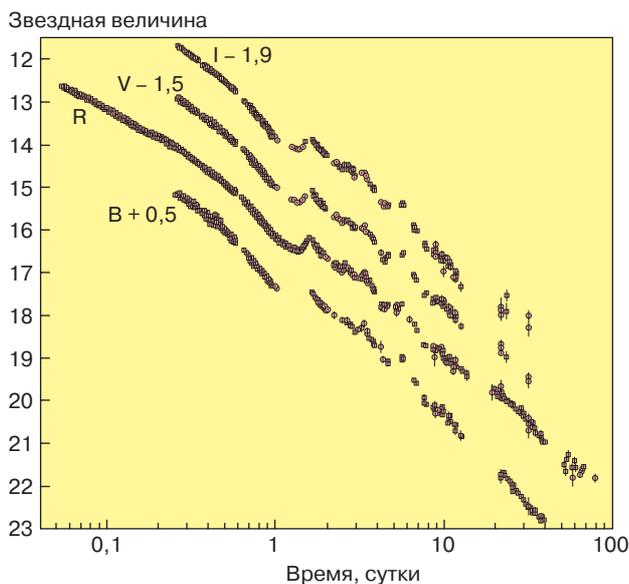


Рис. 3. Изменение блеска оптического ореола яркого гамма-всплеска 030329 на разных длинах волн (I – ближний ИК, R – красный конец видимого спектра, V – видимый спектр, B – голубой конец видимого спектра). Кривые I-, V-, B-диапазонов смещены для улучшения читаемости рисунка. Смещение (в единицах звездной величины) показано цифрами у кривых. На временах порядка нескольких часов после всплеска отчетливо видно изменение темпа спадания блеска, связанное, по-видимому, с эффектами направленного выброса (джета). На более поздних временах вид кривой блеска не описывается простой моделью релятивистской ударной волны в межзвездной среде

сомнения в ассоциации гамма-всплесков и гиперновых. Недавно (март 2004 г.) появились сообщения, что аналогичные особенности наблюдались крупными телескопами в спектре ореола другого близкого гамма-всплеска – 031203.

Однако, несмотря на эти достоверные результаты наблюдений, мы оставляем долю некоторого скепсиса в отношении прямой ассоциации SN–GRB. Во-первых, если гамма-всплески действительно порождаются в результате развития теплового огненного шара, не будем забывать о проблеме барионного загрязнения. Коллапс ядра звезды происходит в окружении большого количества барионов оболочки, и требуется специальное объяснение, почему лишь малая масса (порядка массы Земли) вовлекается в ультрарелятивистский джет. Само образование узконаправленного выброса при коллапсе остается неясным, хотя предположение о достаточно быстром вращении ядра и экстремально сильном магнитном поле может, как говорится, спасти модель. Возможный выход из положения, как пред-

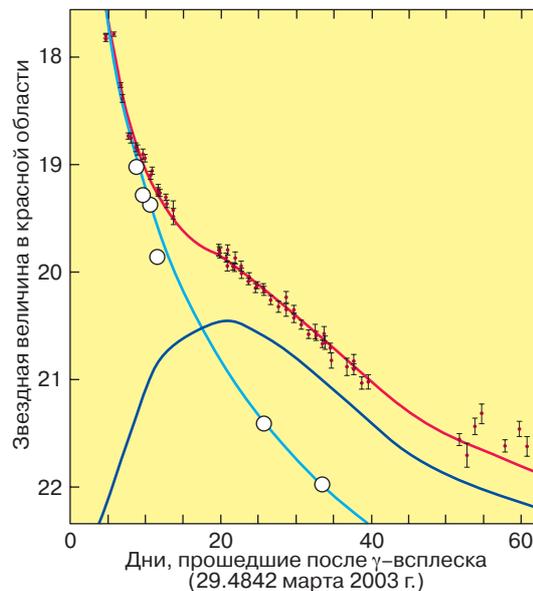


Рис. 4. Попытка описать поведение блеска оптического ореола гамма-всплеска на поздних стадиях добавлением света от сопутствующей сверхновой SN 2003dh, взяв за образец кривую блеска близкой сверхновой SN 1998bw (синяя линия), отнесенной на расстояние ~800 мегапарсек, соответствующее красному смещению гамма-всплеска $z = 0,168$. Голубая линия, идущая по степенному закону t^{-2} , – модель излучения от релятивистской ударной волны, тормозящейся в межзвездной среде. Красная линия проходит вблизи экспериментальных точек и получена сложением голубой и синей линий

ставляется некоторым теоретикам (Р. Блэндфорд), лежит в отказе от самой идеи теплового огненного шара как первопричине гамма-всплеска. Вместо этого Блэндфорд предлагает рассматривать мощный поток чисто электромагнитной энергии (“холодный” джет), который может генерироваться при наличии быстрого вращения и сильного магнитного поля. Впервые электромагнитная модель гамма-всплесков при образовании быстровращающихся нейтронных звезд со сверхсильными магнитными полями ($\sim 10^{15}$ Гаусс) была предложена в начале 1990-х годов В.В. Усовым. Такие потоки электромагнитной энергии теоретически также могут генерироваться и вблизи горизонта почти предельно вращающейся черной дыры при наличии сверхсильного магнитного поля вокруг черной дыры (так называемый механизм Блэндфорда–Знаека).

ОКРУЖЕНИЕ РЕШАЕТ ВСЕ?

Вполне возможно, что само гамма-излучение формируется и совсем другим способом. Но как быть с эффектами теплового излучения, спектрально и фотометрически обнаруженными в оптических ореолах

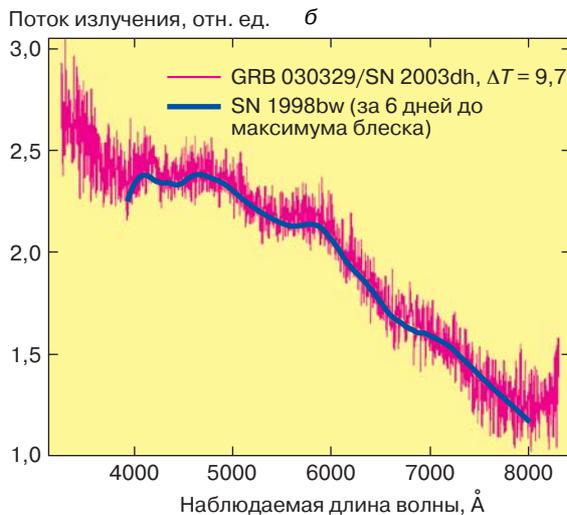
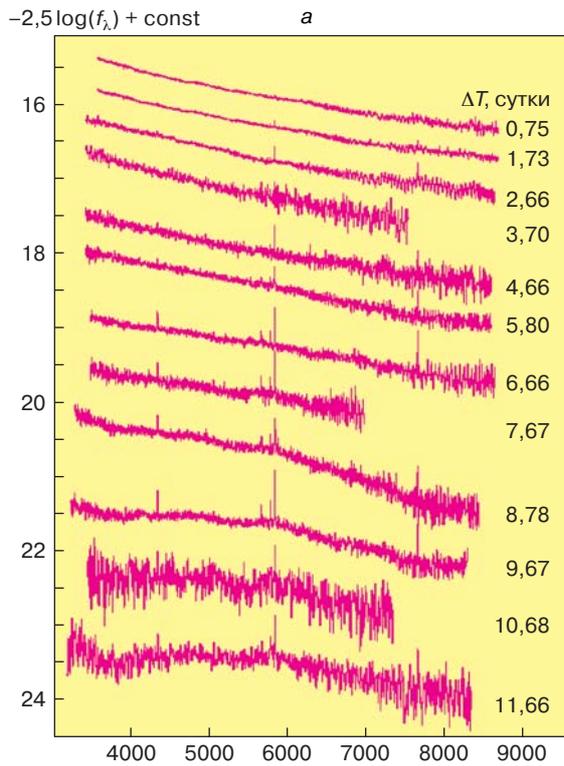


Рис. 5. а – появление широких особенностей в поздних оптических спектрах ореола гамма-всплеска 030329 интерпретируется как свидетельство растущего вклада излучения от сопутствующей гамма-всплеску сверхновой SN 2003dh, ΔT – время после всплеска; б – пример интерпретации спектра гамма-всплеска 030329 через 9,7 дня после всплеска спектром пекулярной сверхновой SN 1998bw, полученным за шесть дней до ее максимума блеска

гамма-всплесков? Здесь надо вспомнить о среде, которая окружает место возникновения гамма-всплеска. Одними из первых в мире на это обратили внимание российские астрофизики Г.С. Бисноватый-Коган и А.Н. Тимохин в 1995 г. Выделение $\sim 10^{51}$ эрг в жестком рентгеновском и гамма-диапазоне не может бесследно пройти в межзвездной среде. Часть излучения поглощается и нагревает окружающую плазму, которая затем остывает и высвечивает запасенное тепло в более мягком диапазоне. Первый количественный расчет таких эффектов в гипотетической двойной системе, в которой происходит гамма-всплеск, был рассчитан автором вместе с С.И. Блинниковым в 1997 г. Оказалось, что фотометрические проявления остывания плазмы вполне сопоставимы с наблюдаемыми оптическими ореолами.

Хорошо известно, что межзвездная среда имеет крайне неоднородную структуру, состоящую (схематично) из более плотных и холодных облаков и разреженного горячего межоблачного пространства (рис. 6). Расчеты тепловой релаксации отдельных облаков в принципе позволяют объяснить наблюдаемые поярчения на оптических кривых ореолов гамма-всплесков и рентгеновские эмиссионные линии многократно ионизованных металлов, которые наблюдались в ранних рентгеновских ореолах некоторых гамма-всплесков. Остается только понять, могут ли в этой модели на фоне непрерывного нетеплового спектра, создаваемого проходящей по среде ударной волной, появиться широкие спектральные особенности, как в спектрах сверхновых. Если это удастся сделать, то наметившаяся ассоциация гамма-всплесков и сверхновых будет подвергнута сомнению.

Таким образом, несмотря на колоссальный прогресс в астрофизике гамма-всплесков в последние годы, который произошел благодаря многоволновым исследованиям ореолов гамма-всплесков, вопрос об их происхождении остается открытым. Пока ясно одно: мы имеем дело с грандиозной космической катастрофой,



Рис. 6. Сложная структура окружающей гамма-всплеск межзвездной среды. Взаимодействие гамма-излучения с окружающими облаками проявляется в сложном поведении оптических ореолов гамма-всплесков

возможно связанной с конечными стадиями эволюции массивных звезд и образованием черных дыр. Впрочем, как часто бывает, причина их происхождения может оказаться совсем другой и неожиданной. Современные наблюдения не позволяют отвергнуть иные гипотезы их происхождения, в том числе связывающие гамма-всплески с заряженными черными дырами (Ремо Руффини) или с необычным проявлением вездесущей темной материи в галактиках (С.И. Блинников). Большие надежды ученые возлагают на успешную работу специализированного космического телескопа НАСА “Свифт”, выведенного на орбиту 20 ноября 2004 г. Основным преимуществом этого аппарата, по замыслу его разработчиков, должно стать одновременное наблюдение гамма-всплесков в очень широком диапазоне электромагнитного спектра – от гамма- до оптического. Несомненно нас ждут впереди новые яркие открытия в увлекательной области изучения космических гамма-всплесков (см. новости на сайтах [5]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Курт В.Г. Экспериментальные методы изучения космических гамма-всплесков // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 6. С. 71–76.

2. Липунов В.М. Военная тайна астрофизики // Там же. № 5. С. 83–89.

3. Лучков Б.И., Митрофанов И.Г., Розенталь И.Л. О природе космических гамма-всплесков // Успехи. физ. наук. 1996. Т. 166. С. 743–761.

4. Постнов К.А. Космические гамма-всплески // Там же. 1999. Т. 169. С. 545–558.

5. Интернет-ресурсы <http://www.astronet.ru>, <http://www.scientific.ru> (текущие заметки о гамма-всплесках С.И. Блинникова, К.А. Постнова, Б.Е. Штерна).

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Константин Александрович Постнов, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ. Член Международного астрономического союза. Лауреат Ломоносовской премии МГУ 2003 г. Область научных интересов – астрофизика высоких энергий и релятивистская астрофизика. Автор свыше 100 научных публикаций.